

УДК 534.6

А.В. Коржик

Национальный технический университет Украины «КПИ», Киев

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ АКУСТИЧЕСКОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЭЛЕМЕНТОВ АНТЕННЫХ РЕШЕТОК, ОБРАЗОВАННЫХ ЭЛЕКТРОУПРУГИМИ ЦИЛИНДРИЧЕСКИМИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯМИ

*С использованием решения задачи гидроэластостатики о приеме звуковых волн системами в виде решеток на основе пьезокерамических круговых тонкостенных преобразователей с разрезными электродами – исследованы общие закономерности акустомеханического взаимодействия преобразователей решетки для различных углов падения плоской акустической волны и волновых размеров.*

**Ключевые слова:** акустическое взаимодействие, решетка, электроупругий преобразователь, форма колебаний, электрод, оболочка, электрическая нагрузка, давление, нормальная составляющая перемещений.

### Введение

Современные требования к гидроакустическим средствам в части расширения частотного диапазона при сохранении или уменьшении массогабаритных характеристик приемно-преобразующих систем обуславливают динамичное развитие задач о создании пространственной избирательности приемных антенных решеток.

Оговоренное направление предполагает изменение расстановки акцентов при проектировании гидроакустических средств, что связывается как с решением проблемы интегрирования аппаратной части гидроакустических средств в бортовые системы носителей, так и с повышением роли собственно антенных и преобразующих систем.

При этом основными предпосылками повышения роли антенно-преобразующей составляющей гидроакустических средств являются:

– тенденция к расширению частотного диапазона, вообще, и смещению рабочих характеристик в низкочастотную область, в частности;

– необходимость управления пространственными характеристиками антенн и преобразователей в разных частотных диапазонах с целью получения требуемых параметров пространственной избирательности.

Весьма интересными в связи с этим являются многомодовые колебательные системы и антенные решетки на их основе.

Представляется, что среди многомодовых колебательных систем наиболее предпочтительны пьезокерамические цилиндрические преобразователи, на поверхность которых нанесены разрезные электроды, обеспечивающие возможность подачи (съем) электрического сигнала в режимах излучения и приема соответственно. С развитием технологии изготовления пьезокерамических элементов в последние годы широко представлен типовой ряд кольцевых круговых цилиндрических пьезокерамических преобразователей, выполненных в виде

сплошной тонкостенной конструкции с радиальной поляризацией [1, 2].

Соосные наборы таких колец позволяют получать преобразователи с образующей требуемой протяженности, а также компоновать антенные системы на их основе [3, 4]. При этом за счет неизбежно существующего акустического взаимодействия преобразователей антенных систем между собой, поля, формируемые приемными решетками таких электроупругих цилиндрических преобразователей сложнее и разнообразнее, чем те, которые созданы аналогичными одиночными рассеивателями. Это приводит к необходимости изучения особенностей взаимодействия элементов антенных решеток по акустическому полю.

Таким образом, **целью настоящей работы** является изучение общих закономерностей взаимодействия по акустическому полю элементов антенной системы, выполненных в виде электроупругих круговых цилиндрических преобразователей.

### Постановка задачи

Используя классическую постановку задачи о взаимодействии источников звука [5], предполагаем, что при падении плоской звуковой волны на рассматриваемую систему приемных электроупругих преобразователей полное поле каждого преобразователя образовано не только полями падающей и порожденной ею отраженной волны, но и полем, создаваемым на поверхности рассматриваемого элемента решетки соседними преобразователями. При этом указанная постановка предполагает использование точечных синфазных элементов решеток, что упрощает ситуацию представления создаваемых ими амплитуд давлений в виде рядов Тейлора по степеням аргумента функций вида  $e^{iu}$ , где  $u = kd$ , где  $k$  – волновое число, а  $d$  – расстояние между фазовыми центрами элементов антенной решетки. Уход от идеализации преобразователя и использование цилиндрического приемника конкретного волнового размера, тем не менее, не исключает проявление эффектов взаимодействия в

виде увеличения или уменьшения амплитуд давления (колебательной скорости) на поверхностях рассматриваемых элементов [5 – 7]. Таким образом, возможно изменение эффективности работы приемника в составе решетки по сравнению с ситуацией расположения его вне её.

Такое изменение связывается с дифракционными эффектами на поверхностях цилиндрических преобразователей, с волновыми соотношениями задачи, а также со сложным характером угловых распределений давлений (колебательных скоростей) по поверхностям приемников, создаваемых как за счет воздействия прямого звука, так и за счет многократных переотражений рассеянной волны от окружающих преобразователей.

Заметим, что оговоренная ситуация, безусловно, не исключает закон сохранения энергии, так как возможное увеличение значения давления (скорости) на поверхностях взаимодействующих преобразователей приводит более быстрому затуханию колебаний.

В рамках режима приема звука рассматриваемая задача относится к классу задач стационарной гидроупругости и аналитически решена в работах [8, 9]. Исходя из этого, приведем лишь основные положения ее постановки.

Предлагается размещение в идеальной несжи-

маемой жидкости с плотностью  $\rho_0$  и скоростью звука  $c_0$  набора пьезокерамических круговых цилиндрических преобразователей. Преобразователи представлены бесконечно длинными электроупругими, радиально поляризованными оболочками произвольного среднего радиуса  $r_{0s}$  с толщиной стенки  $h_{0s}$  (рис. 1). Внутри преобразователей – вакуум. На поверхность каждого преобразователя нанесены разрезные электроды с углами раскрытия  $2|\gamma_{0s}|$  и  $2|\gamma'_{0s}|$ , которые электрически не соединены друг с другом. Толщина электродов, а также неэлектродированные участки поверхности преобразователя считаются малыми, не влияющими на его электромеханические характеристики, а также не требующими привлечения дополнительных граничных условий по механическому и электрическому полю. Для описания движения точек поверхности оболочек (по результатам работы [10]) использованы: уравнения теории тонких оболочек, базирующиеся на гипотезах Кирхгофа-Лява; уравнения для пьезоэффекта; уравнения вынужденной электростатики и соотношения Коши для деформаций. При этом, тангенциальная  $V^s$  и нормальная  $W^s$  составляющие перемещения точек поверхности оболочки могут быть представлены рядами Фурье ( $s$  – номер преобразователя – оболочки в решетке).

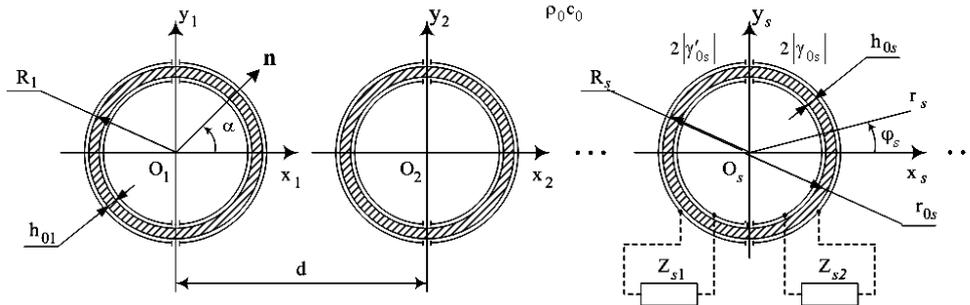


Рис. 1. Линейная решетка электроупругих преобразователей с разрезными электродами

Акустическое поле в среде описывается уравнением Гельмгольца относительно давления  $p$  для цилиндрических координат:

$$\Delta p + k^2 p = 0; \quad p = p(r_s, \varphi_s),$$

где  $\Delta$  – оператор Лапласа;  $k = \omega / c$  – волновое число;  $\omega$  – круговая частота.

Под углом  $\alpha$  на решетку падает плоская звуковая волна единичной амплитуды так, что полное поле  $p_\Sigma$  представляется суперпозицией падающей  $p^0$  и рассеянной каждым преобразователем волны  $p_s$ :

$$p_\Sigma = p^0 + p'_s = p^0 + \sum_{s=1}^N p_s$$

или, учтя локальные системы координат (рис. 1)

$$p_s(r_s; \varphi_s) = p^0(r_s; \varphi_s) + \sum_{s=1}^N p_s(r_s; \varphi_s) = p^0(r_s; \varphi_s) + \sum_{s=1}^N \sum_m A_m^{(s)} H_m^{(1)}(kr_s) e^{im\varphi_s},$$

где  $H_m^{(1)}(kr_s)$  – функция Ханкеля 1-го рода  $m$ -го порядка,  $s = 1; 2; \dots; j; \dots; N$ ,  $-\infty < m < \infty$ .

Граничные условия задачи включают в себя:

- условия сопряжения вида:

$$\frac{\partial W^s}{\partial t} = \frac{1}{i\omega\rho_0} \left. \frac{\partial p(r_s; \varphi_s)}{\partial r_s} \right|_{r_s=R_s},$$

где  $R_s = r_{0s} + h_{0s} / 2$  – радиус  $s$ -й оболочки;

- условие излучения Зоммерфельда [6];
- электрические условия, которые рассмотрены относительно разностей потенциалов на нагрузках электродов преобразователя. При этом для записи полной системы соотношений по электрическому полю использованы уравнения вынужденной электростатики [10]:  $\text{div } \mathbf{D} = 0, \text{ rot } \mathbf{E} = 0$ , где  $\mathbf{D}$  – вектор электрической индукции;  $\mathbf{E}$  – вектор напряженности электрического поля.

Учет количества электродов  $s$ -го преобразова-

теля, величин углов  $2|\gamma_{0s}|$  и  $2|\gamma'_{0s}|$  для каждого из них, а также вида и величины электрической нагрузки электрода проводился в соответствии с работами [8,12] при использовании функций включения вида :

$$f_1(\varphi_s) = \frac{1}{\pi} \sum_k \gamma_{0s} \frac{\sin(k\gamma_{0s})}{k\gamma_{0s}} e^{ik\varphi_s};$$

$$f_2(\varphi_s) = \frac{1}{\pi} \sum_k \gamma'_{0s} \frac{\sin(k\gamma'_{0s})}{k\gamma'_{0s}} e^{ik(\varphi_s+\pi)}, \quad -\infty < k < \infty.$$

В результате совместного решения уравнений, описывающих колебания оболочек, уравнений для акустического поля с привлечением теоремы сложения для волновых цилиндрических функций, а также условий сопряжения и граничных условий по электрическому полю, определению подлежат характеристики акустических полей в виде давлений в акустическом поле на поверхностях каждого преобразователя решетки с учетом симметричности электрического нагружения электродов каждого преобразователя.

Совместное решение указанных уравнений для механических и акустических полей с использованием представлений для функций включения, позволяет свести решение задачи к определению неизвестных коэффициентов  $A_n^{(j)}$  и  $A_p^{(s)}$  бесконечной системы

$$A_n^{(j)} + \sum_{s=1, s \neq j}^N \sum_p A_p^{(s)} Z_{pn}^{(sj)} = S_n^{(j)},$$

где 
$$S_n^{(j)} = \frac{a_n(\omega) \epsilon U_{ny}}{H_n^{(1)'}(kR_j) + a_n(\omega) H_n^{(1)}(kR_j)};$$

$$Z_{pn}^{(sj)} = \frac{J_n'(kR_j) + a_n(\omega) J_n(kR_j)}{H_n^{(1)'}(kR_j) + a_n(\omega) H_n^{(1)}(kR_j)} H_{p-m}^{(1)}(kR_{sj}) e^{-i(p-n)\varphi_{sj}};$$

$J_n'(kR_j)$  – функции Бесселя;  $U_{ny}$  – электрическое напряжение, определяемое из электрических граничных условий;  $a_n(\omega)$ ,  $c$  – обобщающие коэффициенты, определяемые при решении;  $-\infty < n < \infty$ ,  $-\infty < p < \infty$  – переменные суммирования.

Приведенная бесконечная система в рассмотренном для решения классе волновых цилиндрических функций является квазирегулярной [5, 6] и может быть разрешена относительно неизвестных коэффициентов  $A_n^{(j)}$ ,  $A_p^{(s)}$  методом редукции.

### Условия проведения расчетов

При расчетах рассматривалась антенная решетка (рис. 1), состоящая из одного, двух или трех элементов ( $N=1, 2, 3$ ). В качестве элемента решетки выбран тонкостенный круговой цилиндрический вакуумированный внутри пьезокерамический преобразователь, выполненный из пьезоматериала ЦТБС-3 с диаметром  $d_s = 2R_s = 135 \cdot 10^{-3}$  м и толщиной стенки  $h_{os} = 6 \cdot 10^{-3}$  м. Длина образующей элемента антен-

ной решетки 1 удовлетворяла условию  $1 > (3-5)\lambda$ . Полагалось также, что на внутреннюю и внешнюю поверхности преобразователя нанесены две пары электродов раскрывом  $2|\gamma_{0s}|$  и  $2|\gamma'_{0s}|$ , каждая из которых нагружена на свою отдельную электрическую нагрузку  $Z_{sm}^0 = Z_{sm} / Z_0 = 1000$ , представляющую собой активное сопротивление, приведенное к единице длины оболочки-преобразователя. На решетку в направлении единичного вектора  $\mathbf{n}$ , расположенного под углом  $\alpha$  к осям  $O_s x_s$ , падает плоская звуковая волна единичной амплитуды. Угол падения плоской волны  $\alpha$ , выбирался как  $\alpha = 0^\circ$ ,  $\alpha = 90^\circ$ , а текущий угол  $\varphi_s$  изменялся в пределах  $\varphi_s \in (0; 2\pi)$ . Протяженность кабельной линии “электрод-нагрузка” – не учитывалась.

Задача решалась с использованием алгоритма отыскания неизвестных коэффициентов разложений акустических и механических полей для системы преобразователей. При этом находилось нормированное (по отношению к амплитуде падающей волны) значение амплитуды акустического давления  $p_\Sigma = |p_\Sigma^s|$ , а также фаза акустического давления  $\Psi_{p_\Sigma^s}^0$  (градусы) в зависимости от углов  $\varphi_s$  и расстояния между фазовыми центрами преобразователей  $d$  для частот  $f_{00} \approx 8,20$  кГц и  $f_{01} \approx 11,65$  кГц, соответствующих резонансам нулевой и первой моды колебаний оболочки. Количество членов ряда для разложений полей выбиралось – не менее  $\pm 15$ , а порядок усечения бесконечной системы M1 выбирался из условия  $M1 = [2ka] + \beta$ , где  $a = R_s$  и  $\beta = 9 - 15$  (для ближнего поля). При расчетах полагалось также, что электроды приемников ориентированы симметрично относительно оси  $O_s x_s$ , а раскрыв электродов составляет  $2|\gamma_{0s}| = 2|\gamma'_{0s}| = 180^\circ$ .

Результаты расчетов приведены на рис. 2 – 6. На рис. 2 и 3, соответственно, показаны угловые распределения амплитуд и фаз полных давлений на поверхностях преобразователей решетки. При этом рассмотрены две ситуации падения плоской звуковой волны – вдоль и поперек решетки.

При  $\alpha = 0^\circ$  амплитуды давлений  $p_\Sigma^s$  приведены для случаев: одно- (рис. 2, а – кривые 1, 2, 3; рис. 2, б – кривая 4); двух- (рис. 2, а – кривые 4, 5); трех- (рис. 2, б – кривые 1, 2, 3) элементной решетки. Для того же значения  $\alpha$  фазы  $\Psi_{p_\Sigma^s}^0$  показаны для решетки из двух (рис. 3, а – кривые 1 – 4); трех (рис. 3, б – кривые 1, 2) элементов.

При  $\alpha = 90^\circ$  амплитуды давлений  $p_\Sigma^s$  приведены для случаев: двух- (рис. 2, в – кривые 1, 2); одно- (рис. 2, в – кривая 3) элементной решетки.

На рис. 4 представлены зависимости  $p_{\Sigma}^s$  от расстояния  $d$ . В поясняющих обозначениях кривых рис. 4 верхний индекс соответствует номеру элемента решетки, а нижний – градусной величине угла  $\varphi_s$ , определяющей местоположение точки на поверхности преобразователя, для которой находилось данное значение давления.

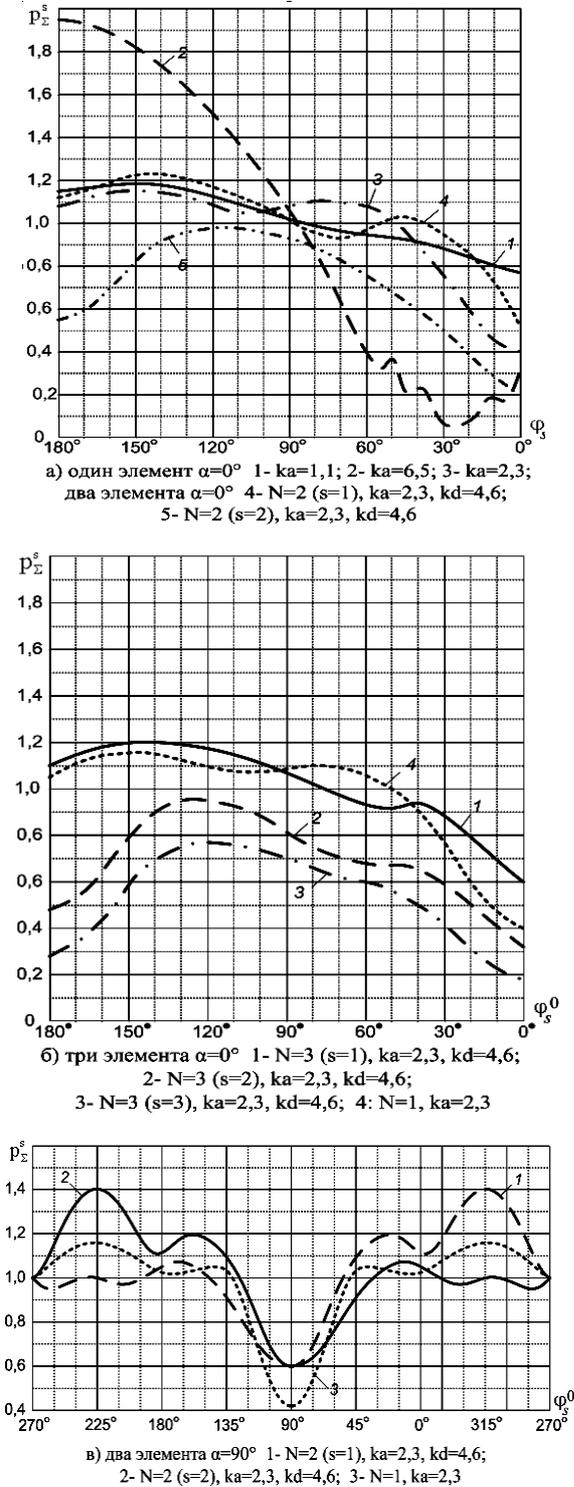


Рис. 2. Угловые распределения амплитуд давлений полного поля по поверхности элементов решетки  $p_{\Sigma}^s$

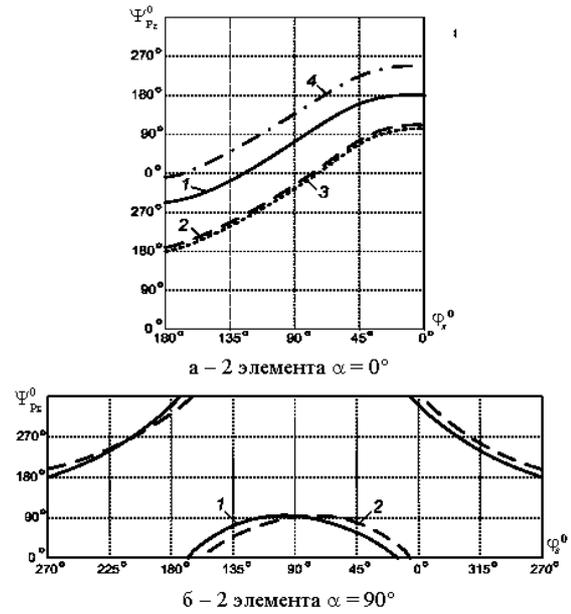


Рис. 3. Угловые распределения фаз полного поля давлений по поверхности элементов решетки  $\Psi_{p_{\Sigma}^s}^0$ :  
 1, 3 –  $N=2$  ( $s=1$ ),  $ka=2, 3$ ,  $kd=4, 6$  (1),  $kd=6, 8$  (2);  
 2, 4 –  $N=2$  ( $s=2$ ),  $ka=2, 3$ ,  $kd=4, 6$  (1),  $kd=6, 8$  (2)

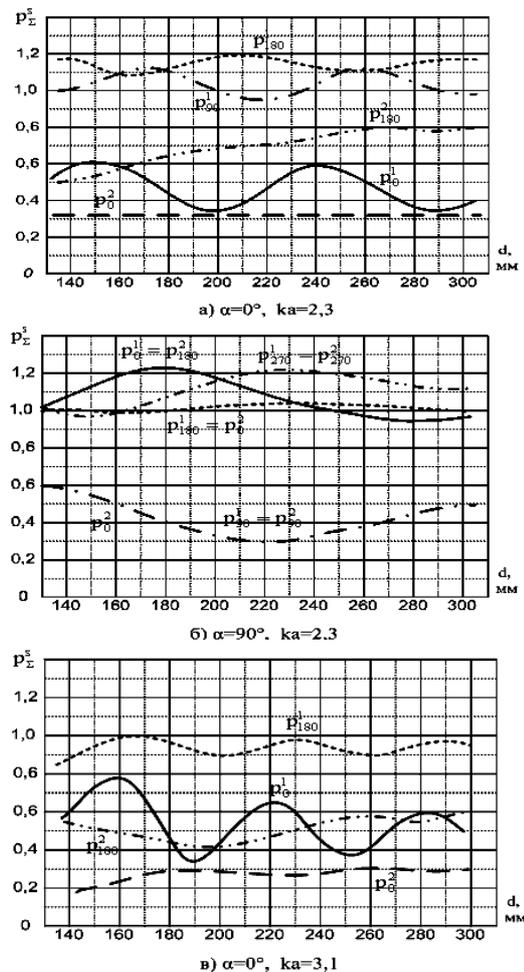


Рис. 4. Зависимости амплитуд давлений  $p_{\Sigma}^s$  на фронтальных и тыловых областях преобразователей от расстояния между фазовыми центрами  $d$

Рис. 5 иллюстрирует угловые распределения нормальных составляющих перемещений  $W^s$  по поверхностям преобразователей решетки для углов падения плоской волны  $\alpha = 0^\circ$  и  $\alpha = 90^\circ$  при фиксированном волновом шаге решетки  $kd = 4.6$ . На рис. 6 приведены распределения фаз нормальных составляющих перемещений  $\Psi_{p_\Sigma^s}^0$  при  $\alpha = 0^\circ$  и волновых расстояниях между центрами элементов решетки  $kd = 4.6$  и  $kd = 6.8$ , что соответствует значениям  $d = 140$  мм и  $d = 200$  мм соответственно.

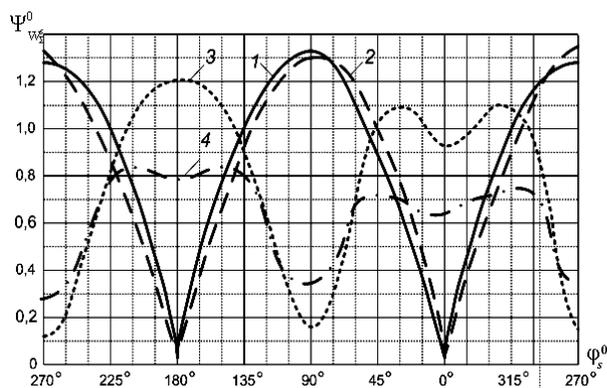


Рис. 5. Угловые распределения амплитуд нормальной составляющей перемещений по поверхности

элементов  $W_\Sigma^s$  решетки:

- $\alpha = 90^\circ$  1 –  $N = 2$  ( $s = 1$ ),  $ka = 2,3$ ,  $kd = 4,6$ ,
- 2 –  $N = 2$  ( $s = 2$ ),  $ka = 2,3$ ,  $kd = 4,6$ ;
- $\alpha = 0^\circ$  3 –  $N = 2$  ( $s = 1$ ),  $ka = 2,3$ ,  $kd = 4,6$ ,
- 4 –  $N = 2$  ( $s = 2$ ),  $ka = 2,3$ ,  $kd = 4,6$

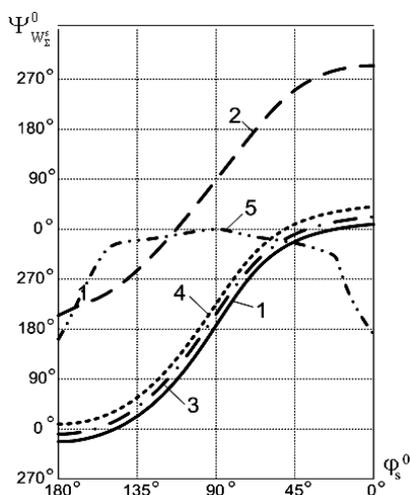


Рис. 6. Угловые распределения фаз нормальной составляющей перемещений преобразователей

$W_\Sigma^s$  решетки:

- $\alpha = 0^\circ$  1 –  $N = 2$  ( $s = 1$ ),  $ka = 2,3$ ,  $kd = 4,6$ ,
- 2 –  $N = 2$  ( $s = 2$ ),  $ka = 2,3$ ,  $kd = 4,6$ ,
- 3 –  $N = 2$  ( $s = 1$ ),  $ka = 2,3$ ,  $kd = 6,8$ ,
- 4 –  $N = 2$  ( $s = 2$ ),  $ka = 2,3$ ,  $kd = 6,8$ ;
- $\alpha = 90^\circ$  5 –  $ka = 2,3$ ,  $kd = 4,6$ ,

### Анализ полученных результатов

Известно [13], что при рассеянии звука цилиндрическими объектами разница уровней давлений в

освещенной области и области акустической тени менее значительна для упругих цилиндров, чем для акустически жестких. Так, при возбуждении одиночного преобразователя на частотах, не совпадающих с резонансами любой из форм (кривые 1 и 2 (рис. 2, а), полученные распределения  $p_\Sigma^s$  характеризуют одиночный электроупругий приемный элемент решетки, как акустически жесткий цилиндр, а при возбуждении на частоте резонанса нулевой моды (кривая 3 рис. 2, а) – как упругий [6, 14, 15].

Поэтому, порядок взаимодействия элементов решетки по акустическому полю целесообразно рассмотреть при возбуждении решетки на резонансных частотах преобразователей в силу большей восприимчивости к изменению условий работы.

Увеличение числа элементов решетки ( $N = 2; 3$ ) приводит к существенным изменениям угловых распределения  $p_\Sigma^s$  (рис. 2, б – кривые 4 и 5 и рис. 2, в – кривые 1, 2 соответственно). При падении волны вдоль осей  $O_s x_s$  со стороны элемента  $s = 1$  остальные элементы решетки, оказываются в зоне его акустической тени, что объясняет общее уменьшение амплитуд давлений на поверхностях “теневых” преобразователей. При этом характер распределения  $p_\Sigma^s$  в траверзных направлениях ( $\varphi_s = 90^\circ; \varphi_s = 270^\circ$ ) меняется незначительно и лишь для фронтальных (по отношению к падающей волне) направлениях ( $\varphi_s = 180^\circ$ ) уменьшение составляет от 6 до 12 дБ (кривые 2 и 3 рис. 2, б).

Полученные отличия, очевидно, связаны с наличием соседних преобразователей решетки, выступающими своеобразными экранами.

Как видно (рис. 4, а в), изменение значений амплитуды давления во фронтальных ( $p_{180}^1, p_{180}^2$ ) и тыльных ( $p_0^1, p_0^2$ ) областях  $s = 1$ -го и  $s = 2$ -го преобразователя носит периодический осциллирующий характер, а амплитуды осцилляций по мере увеличения расстояния  $d$  уменьшаются. При этом значения амплитуд  $p_{180}^1$  и  $p_0^1$ , а также  $p_{180}^2$  и  $p_0^2$  стремятся к соответствующим значениям  $p_\Sigma^s$  для фронта и тыла одиночного преобразователя. Это подтверждает факт ослабления взаимодействия с ростом расстояния между элементами. Отметим, что при рассмотренных величинах  $d$  значения амплитуд давлений на поверхностях преобразователей решетки могут быть как больше, так и меньше соответствующих амплитуд на поверхности одиночного цилиндра. Это не противоречит положениям классического подхода к оценке взаимодействия синфазных точечных источников звука. Особенностью нашего случая является то, что при выбранных волновых соотношениях задачи из-за существенного отличия рассматриваемых цилиндрических преобразователей от точечных, взаимодействие преобра-

зователей решетки не обеспечивает удвоения давления даже при возможной синфазной работе рассеивателей в виду того, что  $kd \gg 1$  и независимость амплитуды  $p_{\Sigma}^s$  от расстояния между элементами практически отсутствует. При этом правильно было бы ожидать, что наиболее существенно взаимодействие будет проявляться для внутренних, обращенных друг к другу областях поверхностей соседних преобразователей. Действительно, наибольшие осцилляции давления свойственны участкам поверхностей в направлениях  $\varphi_s = 0^\circ$  для  $s = 1$ -го и  $\varphi_s = 180^\circ$  для  $s = 2$ -го цилиндра (рис. 2, а и в). В наименьшей степени взаимодействие проявляется для направлений  $\varphi_s = 180^\circ$   $s = 1$ -го и  $\varphi_s = 0^\circ$   $s = 2$ -го преобразователей. При этом для  $s = 2$ -го преобразователя в указанном тыльном направлении  $p_{\Sigma}^s$  практически не зависит от  $d$  (рис. 4, а).

Заметим, что решетке из  $N = 3$  элементов присущи рассмотренные закономерности, а присутствие третьего элемента слабо сказывается на общей картине распределений  $p_{\Sigma}^s$ . Это положение подтверждает результаты работы [4].

Изменение угла падения плоской волны на значение  $\alpha = 90^\circ$  приводит к изменению характера осцилляций и, соответственно, степени участия указанных областей поверхности преобразователей системы в формировании суммарных локальных полей давления  $p_{\Sigma}^s$ . При этом фронтальные ( $p_{270}^1; p_{270}^2$ ), тыльные ( $p_{90}^1; p_{90}^2$ ), внутренние ( $p_0^1; p_{180}^2$ ) и внешние ( $p_{180}^1; p_0^2$ ) траверзные участки поверхностей элементов характеризуются большими амплитудами осцилляций (рис. 4, б), что обеспечивает возрастание суммарного давления на поверхностях преобразователей  $s = 1$  и  $s = 2$  (рис. 2, в – кривые 1, 2) по сравнению с одиночным преобразователем (рис. 2, в – кривая 3). Заметим также, что угловые зависимости  $p_{\Sigma}^s$  асимметричны относительно направления падения волны (ось  $O_s y_s$ ).

Период осцилляций давления (рис. 4, б) при этом несколько больший (по сравнению с ситуацией падения волны с направления  $\alpha = 0^\circ$ ), что, очевидно, связано с уменьшением эффекта экранировки в виду отсутствия преобразователей в зоне тени. Отметим, что, с ростом  $d$  общая тенденция стремления значений амплитуд давлений к соответствующим значениям для одиночного цилиндра с ростом расстояния  $d$  сохраняется.

Заметим также, что рост частоты возбуждения должен приводить к увеличению частоты осцилляций, что проиллюстрировано рис. 4, в для  $f_{01} \approx 11,65$  кГц ( $ka = 3,1$ ).

Очевидно, первопричиной возникновения эффектов взаимодействия является рассеянное поле, а последствием – установившийся режим колебаний оболочек-преобразователей в составе решетки. Рассмотрим его, анализируя нормальные составляющие перемещений точек поверхностей преобразователей  $W^s$ . При  $\alpha = 0^\circ$  и  $\alpha = 90^\circ$  угловые распределения фаз давлений  $\Psi_{p_{\Sigma}^s}^0$  (рис. 3, а) показывают практическое совпадение значений фаз давлений во фронтальных и тыльных областях преобразователей  $s = 1$  и  $s = 2$  (рис. 3, а – кривые 1, 2 и рис. 3, б). Примечательно, что даже с ростом расстояния  $d$ , малое отличие фаз давлений для  $\alpha = 90^\circ$  сохраняется. Это позволяет утверждать, что для  $\alpha = 90^\circ$  в выбранном диапазоне изменения  $d$  пара цилиндрических рассеивателей работает практически синфазно. При этом распределение нормальной составляющей перемещений  $W^s$  характеризует движения элементов как зависимость вида  $\cos(\varphi)$ , с незначительно отличающимися по величине максимумами амплитуд смещений в направлениях  $\varphi_s = 270^\circ; 90^\circ$  и минимумами – в направлениях  $\varphi_s = 180^\circ; 0^\circ$  (рис. 5 – кривые 1 и 2). Распределение фаз  $\Psi_{p_{\Sigma}^s}^0$  при этом также показывает синфазность  $W^1$  и  $W^2$  (рис. 6 – кривая 5), что при указанном характере движения преобразователя приводит к увеличению давления на поверхности соседнего преобразователя (сектор  $\varphi_s = 270^\circ - 90^\circ$  для цилиндра с номером  $s = 1$  и  $\varphi_s = 90^\circ - 270^\circ$  для цилиндра с номером  $s = 2$  рис. 2 в). кривые 1 и 2). Таким образом, при падении волны с направлений  $\alpha = 270^\circ$  и  $\alpha = 90^\circ$  степень взаимодействия определится лишь интерференцией акустических волн близкой амплитуды, которые созданы синфазными цилиндрическими рассеивателями рассмотренной волновой величины.

В ситуации прихода волны с направления  $\varphi_s = 180^\circ$ , характер перемещений меняется. Большую амплитуду перемещений при этом имеет фронтальный участок поверхности преобразователя  $s = 1$ , а меньшую – тыльный участок преобразователя  $s = 2$  (рис. 5 – кривые 3, 4). В этом случае даже для первого преобразователя тыльная область испытывает малые перемещения, что отвечает ситуации создания меньшего давления. При  $kd = 4,6$  (т.е.  $d = 140$  мм), амплитуды перемещений точек смежных внутренних областей преобразователей  $s = 1$  и  $s = 2$  отличаются незначительно (рис. 5 – кривые 3, 4), а фазы отличны на  $\approx 180^\circ$  (рис. 6 – кривые 1, 2). Это говорит о встречных движениях преобразователей  $s = 1$  и  $s = 2$  вдоль оси  $O_s x_s$ , что обеспечивает относительное

увеличение амплитуд давления во внутренних тыльных и фронтальных областях  $p_0^1$  и  $p_{180}^2$  (рис. 4, а).

При выборе расстояния  $d = 200$  мм ( $kd = 6,8$ ), расчеты показывают противофазность давлений на внутренних областях преобразователей (рис. 3 – кривые 3 и 4) и синфазность составляющих перемещений  $W^1, W^2$  (рис. 6 – кривые 3 и 4). Таким образом, встречный характер перемещений преобразователей вдоль оси  $O_s x_s$  изменяется на согласный, что обеспечивает относительное уменьшение амплитуды давления в указанных внутренних областях рассматриваемых преобразователей. Это говорит о том, что при падении волны с направлений  $\alpha = 0^\circ$  и  $\alpha = 180^\circ$  степень взаимодействия определится интерференцией акустических волн различной амплитуды, которые созданы цилиндрическими рассеивателями рассмотренной волновой величины, изменяющими характер движения при изменении волновых размеров решетки. Дальнейшее увеличение расстояния между элементами приводит к периодическому изменению характера перемещений элементов решетки, что и обуславливает периодичность осцилляций давлений на поверхностях преобразователей. При значениях  $d > 10\lambda$ , изменения вида движения элементов при увеличении  $\alpha$  от  $0$  до  $90^\circ$  уже не столь существенно сказывается на изменениях амплитуд давлений  $p_s^S$ , а при  $d > 100\lambda$ , ситуация сводится к рассеянию звука одиночным преобразователям, с утратой эффектов взаимодействия.

### Выводы

Таким образом, общие закономерности акустомеханического взаимодействия элементов антенной системы, образованной электроупругими круговыми цилиндрическими преобразователями состоят в следующем:

- акустомеханическое взаимодействие элементов решетки электроупругих элементов по акустическому полю зависит от количества преобразователей решетки, волновых размеров преобразователей и самой решетки, частоты падающей волны и направления ее прихода;
- степень взаимодействия определяется углом падения волны, характером рассеяния падающей волны и видом перемещений преобразователей решетки, который может изменяться от элемента к элементу;
- изменение вида перемещений преобразователей состоит в изменении взаимного направления движения преобразователей решетки с согласного на встречный, при сохранении общего осциллирующего характера движения преобразователей для рассмотренных волновых условий;
- взаимодействие для звукоосвещенных и затененных областей рассеивателей проявляется в виде миграции областей с измененными (относительно одиночного рассеивателя) амплитудами давлений и зависит от степени упругости преобразователя – рассеивателя;

- наращивание числа рассмотренных преобразователей ( $N \geq 4$ ) не приводит к существенным изменениям распределений давлений по поверхностям элементов рассмотренной решетки;

- для учета эффектов взаимодействия элементов рассматриваемой антенной решетки по акустическому полю необходима оптимизация ее размеров с учетом предполагаемого сектора обзора, вида, типа и волновых размеров преобразователей.

### Список литературы

1. Пьезоматериалы [Электронный ресурс]. – Режим доступа к ресурсу: <http://www/avrora-elma.ru/products.html>.
2. Продукция [Электронный ресурс]. – Режим доступа к ресурсу: <http://www/kmt.kiev.ua/products/avrora-elma>.
3. Аронов Б.С. Электромеханические преобразователи из пьезоэлектрической керамики / Б.С. Аронов. – Л.: Энергоатомиздат, 1990. – 271 с.
4. Лейко А.Г. Подводная акустическая аппаратура и устройства. Т.1. Подводные акустические антенны. Методы расчета звуковых полей / А.Г. Лейко., Ю.Е. Шамакин, В.П. Ткаченко. – К., 2000. – 320 с.
5. Гринченко В.Т. Основы акустики / В.Т. Гринченко, И.В. Вовк, В.Т. Мацура. – К.: Наук. думка, 2007 – 640 с.
6. Шендеров Е.Л. Волновые задачи гидроакустики / Е.Л. Шендеров. – Л.: Судостроение, 1972. – 352 с.
7. Гринченко В.Т. Волновые задачи рассеяния звука на упругих оболочках / В.Т. Гринченко, И.В. Вовк. – К.: Наукова думка, 1986. – 240 с.
8. Коржик О.В. Взаємодія плоскої акустичної хвилі з лінійною решіткою електроупругих циліндричних перетворювачів / О.В. Коржик, О.Г. Лейко // Наукові вісті НТУУ «КПІ». – К., 2001. – № 4. – С. 106-114.
9. Коржик О.В. Врахування кабельного тракту при розв'язанні задач прийому звукових хвиль системами багатомодових п'єзокерамічних циліндричних перетворювачів / О.В. Коржик, О.Г. Лейко // Електроніка і зв'язь. – 2007. – № 3. – С. 54-62.
10. Гринченко В.Т. Механика связанных полей в элементах конструкций. Т.5. Электроупругость / В.Т. Гринченко, А.Ф. Улитко, Н.А. Шульга. – К.: Наук. думка, 1989. – 280 с.
11. Коржик О.В. Формування характеристик напрямленості одиночного приймального електроупругого циліндричного перетворювача з розрізними електродами / О.В. Коржик, О.Г. Лейко // Наукові вісті НТУУ «КПІ». – К., 2005. – № 1. – С. 50-55.
12. Коржик О.В. Об особенностях электромеханических преобразований в приемных пьезокерамических преобразователях с разрезными электродами / О.В. Коржик // Електроніка і зв'язь. – 2010. – № 2. – С. 224-230.
13. Шендеров Е.Л. Излучение и рассеяние звука / Е.Л. Шендеров. – Л.: Судостроение, 1989. – 304 с.
14. Коржик О.В. До питання дифракції плоскої акустичної хвилі на електроупругому циліндричному прийомному перетворювачі / О.В. Коржик, О.Г. Лейко // Наукові вісті НТУУ «КПІ». – К., 2004. – № 6. – С. 83-89.
15. Коржик А.В. Применение метода “сквозной задачи” к исследованию амплитудно-частотных зависимостей характеристик акустического поля приемного цилиндрического пьезокерамического преобразователя с разрезными электродами / А.В. Коржик // Електроніка і зв'язь. – 2010. – № 3. – С. 160-166.

Поступила в редколлегию 30.03.2010

Рецензент: д-р техн. наук проф. О.Г. Лейко, Государственный НИИ Гидроприборов, Киев.

**ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАКОНОМІРНОСТЕЙ АКУСТИЧНОЇ ВЗАЄМОДІЇ ЕЛЕМЕНТІВ АНТЕННИХ РЕШІТОК,  
ЯКІ УТВОРЕНІ ЕЛЕКТРОПРУЖНИМИ ЦИЛІНДРИЧНИМИ ПЕРЕТВОРЮВАЧАМИ**

О.В. Коржик

*З використанням розв'язку задачі гідроелектропружності про прийом звукових хвиль системами у вигляді решіток, які виконано на основі п'єзокерамічних колових тонкостінних перетворювачів з розрізними електродами – досліджено загальні закономірності акустомеханічної взаємодії перетворювачів решітки за різних кутів падіння плоскої акустичної хвилі та хвильових розмірів. Визначено характер коливань перетворювачів решітки в залежності від відстані між елементами.*

**Ключові слова:** акустична взаємодія, решітка, електропружний перетворювач, форма коливань, електрод, оболонка, електричне навантаження, тиск, нормальна складова переміщень.

**THE RESEARCH EFFECTS OF ACOUSTICAL INTERACTION ANTENNAS ELEMENTS,  
WHICH FOUNDED BY PIEZOELASTIC CYLINDRICAL TRANSDUCERS**

A.V. Korzhyk

*The main effects acoustical interactoins of antennas elements are describe in result of solution the tasks about receiving sound waves by system of thin-walled piezoelastic cylindrical transducers. Solution of problem was obtained for range of plane wave angles and wave distances between the antennas elements.*

**Keywords:** acoustic co-operation, grate, electro-resilient transformer, form of vibrations, electrode, shell, electric loading, pressure, normal constituent of moving.